

ПРОЦЕССЫ ДЕПОЛЯРИЗАЦИИ μ^+ -МЕЗОНОВ В МОНОКРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ

*В.А.Гордеев, С.П.Круглов, В.И.Кудинов,
Л.А.Кузьмин, С.М.Микиртычъяни, Е.В.Минайчев,
Ю.В.Обухов, Г.И.Савельев, В.Г.Фирсов,
Г.В.Щербаков*

Экспериментально исследованы зависимости начальной поляризации и скорости медленной релаксации спинов μ^+ -мезонов в монокристаллах кремния от температуры в интервале 300 — 720 К. Проведен анализ данных на основе теории мюониевой деполяризации μ^+ -мезонов. Полученные результаты сопоставлены с данными для германия.

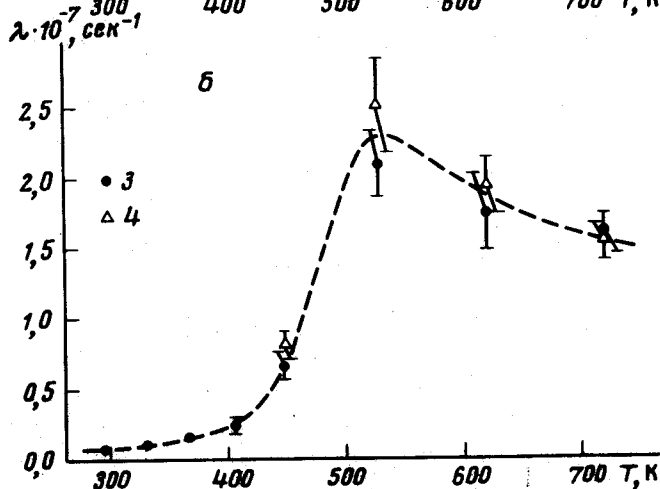
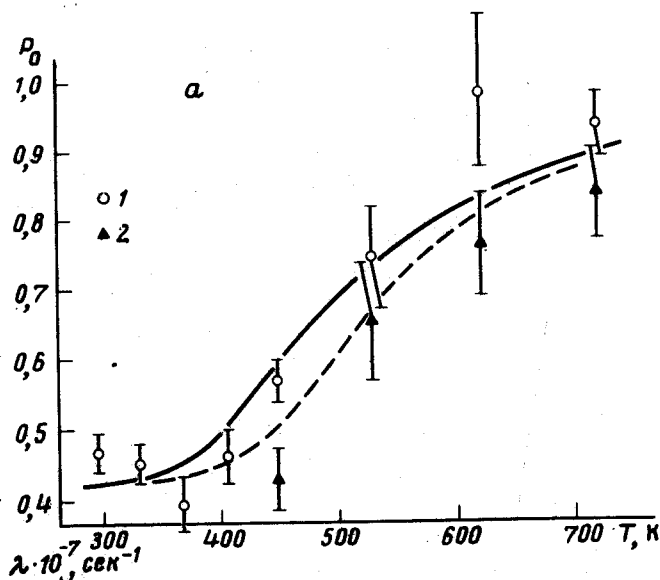
На пучке мюонного канала синхроциклотрона ЛИЯФ АН СССР исследованы взаимодействия μ^+ -мезонов с монокристаллами кремния (n -тип проводимости, концентрация доноров $1,6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$). Характеристики пучка — начальный импульс 110 Мэв/с , исходная поляризация μ^+ -мезонов — 84%, используемая скорость счета частиц, останавливающихся в мишени, $\sim 8 \cdot 10^3 \text{ сек}^{-1}$ (для графита толщиной 4 г/см^2), примесь π^+ -мезонов и позитронов на выходе канала не превышает 0,5%.

В эксперименте изучалось распределение времен μ -распадов в перпендикулярном (относительно начального направления спина μ^+ -мезона) внешнем магнитном поле, когда вероятность регистрации распада модулирована во времени вследствие пространственной асимметрии распада и наличия прецессии спина μ^+ -мезона. Программа опытов включала определение начальной ($t = 0$) амплитуды мезонной прецессии и скорости ее релаксации (λ) при варьировании температуры мишени и напряженности магнитного поля. Экспериментальные результаты представлены на рисунке. Нормировка значений коэффициента асимметрии для получения начальной поляризации (P_0) и контроль за отсутствием систематических ошибок проводились с учетом энергетического спектра позитронов распада по измерениям в эталоне — мишени из графита, где деполяризация μ^+ -мезонов практически отсутствует [1].

При анализе возможных схем процесса взаимодействия μ^+ -мезонов с кристаллической решеткой кремния необходимо учитывать, что параметры $P_0(T)$ и $\lambda(T)$ характеризуют различные во времени стадии процесса. Действительно, $P_0(T)$ дает представление о соотношении между диамагнитными (P_0) и парамагнитными ($1 - P_0$) продуктами взаимодействия, которое сложилось за времена $\tau \sim 10^{-9} - 10^{-10} \text{ сек}$ ($\tau \lesssim 1/\omega'$, $1/\omega_0$, где $\omega' = 2 + 4 \cdot 10^9 \text{ сек}^{-1}$ — частота мюониевой прецессии в использованных магнитных полях, $\omega_0 = 1,14 \cdot 10^{10} \text{ сек}^{-1}$ — частота сверхтонкого расщепления мюония в кремнии [2,3]). С другой стороны, релаксация спина μ^+ -мезона происходит за характерные времена $\sim 10^{-7} \text{ сек}$ (см. рисунок), что свидетельствует о последующем, более медленном, возникновении электронного парамагнетизма среды в непосредственной близости от μ^+ -мезона. Как видно, этот процесс более интенсивно протекает в области высоких ($> 500\text{K}$) температур, что отличает его от известного диполь-дипольного взаимодействия между магнитными моментами μ^+ -мезонов и ядер кристаллической решетки [4,5].

Рассматриваемый ниже механизм взаимодействия μ^+ -мезонов в решетке кремния основан на представлениях, развитых [6,7] для германия, где процессы деполяризации μ^+ -мезонов экспериментально исследованы более подробно [8,9]. В области температур 300 — 400K значение поляризации $P_0 \approx 0,42$ (см. рисунок) обусловлено, по-видимому, конечным результатом надтепловых, либо внутритрековых процессов, поскольку для того же образца кремния при 350K методом восстановления в продольных магнитных полях недостающей поляризации μ^+ -мезонов было показано [2] наличие мюония. Прецессия с мезонной частотой обусловлена μ^+ -мезонами, которые соединены с атомами кри-

таллической решетки диамагнитной химической связью типа гидридной Si - H [10]. Релаксация спинов μ^+ -мезонов вызвана нарушением диамагнетизма связи, возникающем из-за тепловых колебаний решетки [7].



Зависимость начальной поляризации (а) и скорости релаксации (б) спинов μ^+ -мезонов в кремнии от температуры. Ось абсцисс — абсолютная температура, оси ординат — а — значения начальной поляризации P_0 , б — скорость релаксации λ . Кривые 1, 3 — при напряженности магнитного поля 236 кривые 2, 4 — при 472 э. Плавные кривые рис. а — расчет по теории мюониевой деполаризации

Для взаимодействия мюония в германии было получено [6] среднее значение высоты активационного барьера $\Delta E(\text{Ge}) = 0,17 \text{ эв}$ для низколегированных образцов. Аналогичные расчеты представляют интерес и для взаимодействий мюония в кристаллической решетке кремния. В работе [6] на основании зависимостей $P_0(T)$ и сдвига фазы мезонной прецессии вычислены параметры теории [11] мюониевой стадии деполаризации μ^+ -мезонов: τ — продолжительность мюониевой стадии, ν — частота спин-обменных взаимодействий; β — доля поляризации, обусловленная μ^+ -мезонами, входящими в диамагнитное соединение. Представленный на рисунке экспериментальный материал не дает возможности раздельного определения всех параметров, поэтому проводились вычисления одного параметра τ при значениях $\nu\tau \ll 1$ [2];

$\beta = 0,42 \pm 0,02$; $\omega_0(\text{Si}) = 1,14 \cdot 10^{10} \text{ сек}^{-1}$ [2,3]. Плавные кривые $P_0(T)$ на рисунке отражают температурную зависимость, подчиняющуюся экспоненциальному закону $\tau \sim T^{-1/2} \exp(\Delta E/kT)$ при высоте активационного барьера $\Delta E = 0,18 \text{ эв}$.

Причины наличия максимума в зависимости $\lambda(T)$ могут быть связаны, например, с резким увеличением концентрации свободных электронов в зоне проводимости полупроводника за счет появления собственной проводимости материала. Оценки показывают, что последняя величина становится заметной при температуре выше 500 К. Качественно аналогичная зависимость $\lambda(T)$ получена для германия [7], где также показано, что скорость медленной релаксации с ростом концентрации донорных примесей уменьшается. Дальнейшее накопление экспериментальных данных весьма существенно для детального сравнения взаимодействий μ^+ -мезонов с кристаллической решеткой столь близких по физико-химическим свойствам веществ, как кремний и германий.

Авторы выражают благодарность А.Л.Геталову за помощь при проведении измерений.

Институт теоретической
и экспериментальной физики

Поступила в редакцию
20 февраля 1978 г.

Институт ядерной физики
им. Б.П.Константинова
Академии наук СССР

Литература

- [1] R.A.Swanson. Phys. Rev., 112, 580, 1958.
- [2] Д.Г.Андрианов, Е.В.Минайчев, Г.Г.Мясищева, Ю.В.Обухов, В.С.Роганов, Г.И.Савельев, В.Г.Фирсов, В.И.Фистуль. ЖЭТФ, 58, 1896, 1970.
- [3] J.H.Brewer, K.M.Crowe, F.N.Gygax, R.F.Johnson, B.D.Patterson, D.G.Fleming, A.Schenck. Phys. Rev.Lett., 31, 143, 1973.
- [4] Е.В.Минайчев, Г.Г.Мясищева, Ю.В.Обухов, В.С.Роганов, Г.И.Савельев, В.Г.Фирсов. ЖЭТФ, 57, 421, 1969.
- [5] В.Г.Гребинник, И.И.Гуревич, В.А.Жуков, А.П.Маньч, Е.А.Мелешко, И.А.Муратова, Б.А.Никольский, В.И.Селиванов, В.А.Суетин. ЖЭТФ, 68, 1548, 1975.
- [6] В.И.Кудинов, Е.В.Минайчев, Г.Г.Мясищева, Ю.В.Обухов, В.С.Роганов, Г.И.Савельева, В.М.Самойлов, В.Г.Фирсов. ЖЭТФ, 70, 2041, 1976.
- [7] В.И.Кудинов, Е.В.Минайчев, Г.Г.Мясищева, Ю.В.Обухов, В.С.Роганов, Г.И.Савельев, В.Г.Фирсов. Письма в ЖЭТФ, 25, 331, 1977.
- [8] И.И.Гуревич, И.Г.Ивантер, Е.А.Мелешко, Б.А.Никольский, В.С.Роганов, В.И.Селиванов, В.П.Смилга, Б.В.Соколов, В.Д.Шестаков. ЖЭТФ, 60, 471, 1971.

[9] Д.Г. Андрианов, Г.Г. Мясищева, Ю.В. Обухов, В.С. Роганов, Г.И. Савельев, В.Г. Фирсов, В.И. Фистуль. Физика и техника полупроводников, 12, 161, 1978.

[10] Д.Г. Андрианов, Ю.В. Обухов, В.Г. Фирсов, В.И. Фистуль. ДАН СССР, 201, 884, 1971.

[11] И.Г. Ивантер, В.П. Смилга. ЖЭТФ, 54, 559, 1968.
